Journal of Agricultural Machinery
Vol. 11, No. 2, Fall - Winter 2021, p. 247-262

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۲۶۲-۲۴۷

مقاله علمی-پژوهشی

مدل‌سازی تهویه و جانمایی فن‌ها، پدها و دریچه‌ها در یک گلخانه هشت‌وجهی

جلال جوادی مقدم[1*]، سعید عزلتی[2]، قاسم زارعی[1]، داود مومنی[1]، فرزاد آزادشهرکی[1]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۶

چکیده

در این تحقیق، تهویه و سرمایش یک گلخانه که ستون‌های آن بر رئوس یک هشت‌وجهی منتظم قرار گرفته‌اند بررسی شد. سه جانمایی متفاوت از محل قرارگیری فن‌ها، دریچه‌ها و پدها بر روی این سازهٔ گلخانه با استفاده از مباحث دینامیک سیالاتی نرم‌افزار سالیدورک ۲۰۱۸ شبیه‌سازی شد که بر این اساس، بهترین محل قرارگیری فن‌ها، پدها و دریچه‌های تهویه مشخص گردید. این جانمایی‌ها شامل ابتدا قرارگیری فن‌ها در قسمت تاج سقف و دریچه‌ها در دیواره‌های هرم است. سپس در جانمایی دوم، پدها و فن‌ها در دیواره‌های طولی گلخانه در مقابل یکدیگر واقع شده و در حالت آخر نیز فن‌ها در سقف هرم‌های گلخانه و پدها در دیوارهای طولی روبه‌روی هم (پدهای موازی) در نظر گرفته شدند. در جانمایی اول، امکان ایجاد وزش باد به‌صورت چرخشی در گلخانه امکان‌پذیر است. لذا تبادل حرارتی قسمت‌های مختلف محیط گلخانه افزایش پیدا خواهد نمود و در این حالت میزان گاز دی‌اکسید کربن دریافتی توسط گیاه نیز بالا خواهد رفت. در حالت فن و پد روبه‌روی هم، باد عبوری از پد به‌صورت یکنواخت در گلخانه جریان پیدا کرده و از فن‌های مقابل خارج می‌شود که منجر به ایجاد جریان هوایی مطلوب در گلخانه می‌شود. در صورت استفاده از فن در سقف و پدها به‌صورت موازی در گلخانه، رطوبت نسبی بالا رفته و دما به‌ویژه در هنگام استفاده از سایه‌اندازها به شدت کاهش می‌یابد. این حالت برای سرمایش در مناطق خشک می‌تواند کاربرد داشته باشد. همچنین نتایج نشان داد که با انتخاب صحیح چیدمان پد، فن و دریچه در گلخانه هشت‌وجهی، می‌توان از این گلخانه در شرایط آب و هوایی مختلف به‌ویژه گرم و خشک، استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تهویه، دینامیک سیالات محاسباتی، سرمایش، گلخانه هشت‌وجهی

مقدمه

گلخانه‌ها محیط‌های کنترل شده‌ای هستند که می‌توانند شرایط رشد مطلوب گیاه را در تمام فصل‌های سال فراهم نمایند. در یک گلخانه باید عواملی مانند نور، دما، رطوبت، دی‌اکسید کربن و ترکیب هوا در سطح بهینه نگه‌داشته شوند تا شرایط لازم برای رشد و فتوسنتز گیاه فراهم شود (Barzegar and Yadegari, 2010; Zarei, 2017; Jafari *et al.*, 2019).

رشد و پرورش گیاهان در گلخانه مستلزم ایجاد تهویه مناسب در گلخانه است که با هدف کاهش دما، جبران کمبود دی‌اکسید کربن مورد نیاز گیاه، کاهش رطوبت نسبی و خارج نمودن گازهای سمی از گلخانه است. عمل تهویه با استفاده از دریچه‌ها یا فن‌ها انجام می‌شود (Teitel *et al.*, 2019). در حال حاضر از انواع گلخانه با شکل‌های متفاوت در سطح جهان برای تولید انواع محصولات کشاورزی استفاده می‌شود (Ghani *et al.*, 2019). طرح سازه یک گلخانه تاثیر قابل‌توجهی در افزایش بهره‌وری آب و انرژی و توزیع یکنواخت‌تر دما و رطوبت‌نسبی و در نتیجه، بهبود جریان تهویه در گلخانه‌ها دارد (Ghoulem *et al.*, 2019; Zarei, 2017; Katsoulas *et al.*, 2015; Ziaaddini *et al.*, 2019).

در مباحث مربوط به مدل نمودن آشفتگی جریان سیال، هنوز یک مدل جامعی که بتواند حل صحیحی از نیمرخ جریان سیال را بعد از برخورد به جسم ساکن نمایش دهد، وجود ندارد و به نظر می‌رسد نمی‌توان آشفتگی ایجاد شده سیال در اثر برخورد با اجسام را به‌طور کامل، مدل‌سازی کرد. در گلخانه‌های چند قلو نیز به‌دلیل شکل و انحنای موجود در سطح سقف، این آشفتگی جریان سیال به‌وضوح دیده می‌شود. لذا این موضوع از چالش برانگیزترین مباحث علم مکانیک سیالات است. به همین دلیل بسیاری از محققینی که در زمینه آشفتگی سیالات فعالیت می‌نمایند، از مدل‌سازی آشفتگی با روش‌های عددی استفاده می‌کنند (Zhang *et al.*, 2019). در بررسی جریان آشفتگی ایجاد شده در پشت اجسام، معادلات متنوعی وجود دارند که این معادلات غالباً به‌منظور تخمین نیمرخ حرکت سیال بعد از برخورد به جسم ارائه شده‌اند (Schulein, 2010). ژونگ و همکاران (Zhong *et al.*, 2018) به‌منظور بررسی پروفیل آشفتگی جریان‌های هوایی از مدل آشفتگی SST[3] استفاده نموده و گزارش کردند که این روش برای مدل نمودن جریان آشفته در مقیاس بزرگ،

۱- عضو هیأت علمی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات،آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۲- همکار بخش خصوصی
(*- نویسنده مسئول: Email: Jalaljavadimoghaddam@gmail.com)
DOI: 10.22067/jam.v11i2.82130

3- Shear Stress Transport

بسیار کارآمد است. در بررسی آشفتگی جریان سیال در پشت اجسام و نحوهٔ تشکیل نیمرخ آن، تحقیقات لونگو (Longo *et al.*, 2017) نشان‌دهنده تاثیر قابل توجه ضرایب هیدرودینامیک فشار در تولید شکل نیمرخ آشفتگی بود. شیرزادی و همکاران (Shirzadi *et al.*, 2017) از روش‌های بهینه‌سازی احتمالاتی[1] برای مدل‌سازی جریان سیال آشفته استفاده نمودند و نتایج کار خود را با مدل رنس[2] مقایسه نمودند. مقایسات حاکی از بالا بودن دقت نتایج بود. تانگ و همکاران (Tong *et al.*, 2018) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، توزیع دما و وضعیت تهویه را در یک گلخانه خورشیدی یک‌طرفه در چین بررسی نمودند تا بتوانند مکان مناسب‌تری را برای چیدمان دریچه‌های گلخانه انتخاب کنند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از این بود که دمای داخل گلخانه با افزایش ارتفاع دریچه افزایش می‌یابد. هی و همکاران (He *et al.*, 2018) به‌منظور بررسی تاثیر باد بر سازه‌ها از روش‌های جدید تحلیل بر اساس پایگاه داده استفاده کردند. آن‌ها با تشکیل یک پایگاه داده از تخریب سازه‌ها، توانستند به نوعی علم پیش‌بینی، جهت ارتقای سطح طراحی سازه دست پیدا نموده و حتی آن‌را به شرکت‌های بیمه نیز پیشنهاد کردند.

اقلیم و محل احداث گلخانه از عوامل مؤثر بر انتخاب نوع گلخانه و نیروهای ناشی از فشار باد بر سازه و شرایط تهویه در گلخانه است. از این‌رو سعی می‌شود تا گلخانه‌ها در مناطقی احداث شوند که بتوانند از وزش متعادل باد بهره‌مند شده و با استفاده از تهویه در گلخانه، در مصرف انرژی صرفه‌جویی شود. از طرف دیگر در نظر گرفتن اقلیم در زمان احداث گلخانه باعث می‌شود تا سازه‌های مقاوتری در برابر بادهای شدید احداث گردد. همچنین افزایش استحکام سازه‌ها نیز باید به‌گونه‌ای باشد که به‌صورت غیرمستقیم کاهش مصرف انرژی در گلخانه‌ها را به دنبال داشته باشد (Cheng *et al.*, 2018). مبتکر و همکاران (Mobtaker *et al.*, 2017) با اندازه‌گیری تغییرات حرارت جذب شده توسط مدل الکتریکی در یک گلخانه دریافتند که سازه یک گلخانه نقش به‌سزایی در میزان کاهش مصرف انرژی در گلخانه دارد. به‌طورکلی، محققین از پارامترهایی نظیر دما، رطوبت، سرعت بادهای ایجاد شده از سیستم بازچرخانی هوای گلخانه و توزیع گازها در تحلیل سیالاتی داخل گلخانه‌ها استفاده می‌کنند و تاکنون مدل‌های متنوعی به‌منظور افزایش دقت محاسبات سیالاتی در گلخانه‌ها ارائه شده‌است (Saberian and Sajadiye, 2019). ولازکوئز و همکاران (Velazquez *et al.*, 2015) از مدل پیشنهادی دارسی- فرچیمر[3] (Majeed *et al.*, 2019) برای مدل نمودن توزیع دما، باد و رطوبت‌نسبی در گلخانه استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از این روش نتیجه گرفتند که استفاده از پردهٔ ذخیرهٔ انرژی می‌تواند نقش بسیار مهمی در توزیع یکنواخت حرارت در گلخانه و تهویه مناسب در گلخانه داشته باشد. نتایج پژوهش این محققین توسط نتایج تحقیقات سانتولینی و همکاران (Santolini *et al.*, 2018) و مجدوبی و همکاران (Majdoubi *et al.*, 2016) نیز تایید شده است. از این‌رو می‌توان دریافت که علاوه بر سازه و تأسیسات مناسب، برای افزایش راندمان تهویه (Mistriotis *et al.*, 1997; Rasheed *et al.*, 2019; Ould Khaoua *et al.*, 2006) در یک گلخانه به تجهیزات دیگری نظیر پرده‌های ذخیرهٔ انرژی نیز نیاز است. مدل‌های مختلفی برگرفته از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای مدل‌سازی تهویه، رطوبت و توزیع دما در گلخانه تهیه و معرفی شده‌اند. بولارد و همکاران (Boulard *et al.*, 2017) توانستند نحوه توزیع حرارت در گلخانه‌های شیشه‌ای و تاثیر آن روی تبخیر و تعرق را با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی مدل نمایند. مدل‌های به‌دست آمده توسط این محققین، دارای دقت بالای شبیه‌سازی بودند. برخی از محققین به‌منظور بررسی تهویه در گلخانه‌ها، از روش‌های مدل‌سازی ریاضی استفاده نموده‌اند. به‌عنوان مثال، لی و شورت (Lee and Short, 2001) برای افزایش دقت در مدل‌سازی، پارامتری را به‌عنوان پارامتر انطباق در نرخ تهویه وارد کرده و پس از تشکیل یک مکانیزم حلقه بسته در چندین مرتبه تکرار، خطای مدل خود را با مقادیر واقعی مقایسه و با تغییر پارامترهای معادلات حاکم، توانستند خطای مدل خود را با توجه به مقادیر موجود در گلخانه واقعی کاهش داده و مدلی با دقت بالا تهیه نمایند.

در ایران به‌دلیل مسائل اقتصادی و نیز پایین بودن دانش تخصصی مهندسی گلخانه نسبت به کشورهای پیشرو در صنعت گلخانه، عموماً بهره‌برداران از طرح‌های مختلف سازه گلخانه بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به اقلیم، موقعیت جغرافیایی و گیاه، استفاده می‌کنند. این امر، ضمن استفاده از آب و انرژی بیش از حد و کاهش بهره‌وری تولید، باعث کاهش استحکام سازه در مقابل بارهای وارد بر آن به‌ویژه بار باد نیز شده است (Firoozi *et al.*, 2014; Zarei, 2017). این در حالی است که با طراحی یک گلخانه متناسب با اقلیم منطقه، می‌توان هزینه‌های اجرا، آب و انرژی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. هدف از این پژوهش یافتن محل مناسب قرارگیری فن‌ها و دریچه‌های تهویه در یک گلخانه هشت‌وجهی با ابعاد ۳۰× ۷۵ متر مربع بود تا بتوان در این نوع از گلخانه، جریان تهویه چرخشی به‌وجود آورد. از مزایای این گلخانه هشت‌وجهی نسبت به گلخانه‌های رایج، مقاومت کافی در برابر بارهای وارده (مانند بار باد ناشی از سرعت ۱۲۰ $km.h^{-1}$، بار برف ۲۰ $kg.m^{-2}$، بار آویز ۲۰ $kg.m^{-2}$ و غیره) و سبک‌تر بودن نسبت به گلخانه‌های معمولی است. این گلخانه ضمن به‌وجود آوردن امکان استفاده از تیر و ستون‌هایی با مقاطع مربعی که در بازار نسبت به پروفیل‌های لوله‌ای

1- Probabilistic Optimization Method
2- Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS)
3- Darcy–Forchheimer

در دسترس‌تر هستند، به دلیل طرح مناسب خود، در مقابل بار باد از تحمل مطلوبی هم برخوردارند. همچنین فشار ناشی از بار باد توسط خرپاهایی که در هر قسمت از گلخانه به هشت جهت امتداد یافته‌اند، قادر خواهند بود تا سایر اعضای سازه را به‌صورت جمعی، در تحمل بار باد شرکت دهند. در تهویه، تفاوت طرح ظاهری این گلخانه نسبت به دیگر گلخانه‌های موجود، قابلیت نصب فن در راس هرم سقف است. این عمل مانع از جمع شدن تعریق گلخانه بر روی سطح داخلی پوشش می‌شود. همچنین قابلیت نصب پد در دو طرف دیواره طولی گلخانه را ممکن می‌سازد که ارتباط مستقیمی با افزایش رطوبت و کاهش دما دارد. از مزیت‌های دیگر طرح این گلخانه، ایجاد جریان چرخشی باد و متمرکز نمودن جریان هوا پیرامون گیاه است. این عمل فرصت بیشتری را برای جذب گازهای مورد نیاز به گیاه می‌دهد. همچنین طرح هشت‌وجهی و به‌ویژه شکل هرم سقف به گونه‌ای‌است که باعث می‌شود تا بتوان هم‌زمان، بر روی سقف در راستای طولی و هم عرضی، ناودانی برای هدایت آب برف و باران در نظر گرفت. این موضوع باعث افزایش سرعت تخلیه آب از روی سقف در هنگام بارش برف و باران شدید شده، در نتیجه سازه سقف مقاومت بیشتری از خود در مقابل بارش برف و باران نشان خواهد داد. از دیگر مزایای این گلخانه، می‌توان به قابلیت جانمایی متنوع پد، دریچه و فن در آن اشاره نمود. در این تحقیق، توزیع جریان هوایی ناشی از سه مدل جانمایی، شبیه‌سازی و بررسی شده است. طرح گلخانه هشت‌وجهی مورد نظر به‌نحوی است که امکان استفاده از ۱- فن‌ها در سقف هرم‌های گلخانه همراه با دریچه در دیوارهای هرم، ۲- پد و فن روبه‌روی هم در دیواره‌های طولی و ۳- فن‌ها در سقف هرم‌های گلخانه و پدها در دیوارهای طولی (پدهای موازی) را ممکن می‌سازد. به‌طور معمول در گلخانه‌های تجاری که پدها و فن‌ها در دیواره‌های مقابل یکدیگر جانمایی می‌شوند، محدودیت‌های مشابهی در تهویه و سرمایش آن‌ها به‌وجود می‌آید که از آن دسته می‌توان به محدودیت در استفاده از ابعاد پد، تعداد و یا محل قرارگیری فن‌ها اشاره نمود. بدیهی است که وجود این محدودیت‌ها باعث محدود کردن طراحی سیستم‌های تهویه و سرمایش گلخانه می‌شود. از طرفی برای جبران این محدودیت‌ها، هزینه‌های ثابتی برای تهویه در گلخانه باید در نظر گرفته شود که از آن دسته می‌توان به هزینه نصب و انرژی فن‌های سیرکوله در گلخانه اشاره نمود. هدف از این تحقیق، ارائه یک طرح گلخانه‌ای با قابلیت تنوع در جانمایی پدها، فن‌ها و دریچه‌ها است. با استفاده از این قابلیت می‌توان عملکرد تهویه گلخانه را متناسب با شرایط اقلیمی منطقه به‌ویژه در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری افزایش داد. همچنین طرح خاص وضعیت دریچه‌های این گلخانه، قابلیت ایجاد جریان چرخشی هوا را به‌وجود آورده که می‌تواند شرایط جذب گازهای مورد نیاز گیاه را بهبود می‌بخشد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی سه روش مختلف تهویه در گلخانه هشت‌وجهی مدل‌سازی شدند تا پس از تهیه نیمرخ جریان هوا در گلخانه، مناسب‌ترین جانمایی پد و فن‌های تهویه به‌دست آید. این روش‌های مختلف تهویه در گلخانه عبارت بودند از: تهویه با استفاده از فن در سقف هرم‌های گلخانه همراه با دریچه در دیوارهای هرم، تهویه با استفاده از پد و فن روبه‌روی هم در دیوارهای جانبی گلخانه و تهویه با استفاده از فن در سقف هرم و پد در دیوارهای جانبی گلخانه (به‌ترتیب شکل‌های ۱- الف، ۱- ب و ۱- ج).

تهویه در داخل گلخانه چه در حالت تهویه آزاد و چه در حالت تهویه اجباری تابعی از محیط بیرون گلخانه است. در این تحقیق جهت تحلیل جریان هوایی در داخل گلخانه فرض شده که شرایط استاندارد آب و هوایی وجود دارد به‌طوری‌که اختلاف دمای داخل و خارج گلخانه ۵ درجه سیلسیوس و فشار محیط برابر با فشار هوا در سطح آزاد دریا در نظر گرفته شده است. همچنین سرعت جریان باد در فضای بیرون از گلخانه به‌گونه‌ای فرض شده تا یکنواختی ورود هوا از دریچه به داخل یا هنگام خروج از فن به‌وجود نیاید. جنس پروفیل و قوطی‌های استفاده شده از فولاد ساختمانی است که در آن از اثر گالوانیزه پوشش فلز سازه در افزایش استحکام صرف‌نظر شده است. سرستون‌ها همگی به‌صورت تسمه‌های فلزی کنار هم با ضخامت ۵ میلی‌متر هستند که تکنولوژی ساخت و تولید آن‌ها بر اساس خمکاری، پانچ یا سوراخ‌کاری است. در سناریوهای عنوان شده، هنگامی‌که فن بر روی سقف قرار دارد، در هر راس هرم یک فن جانمایی شده و در حالت فن ها در کنار نیز، تعداد ۹ فن قرار داده شده است. عضو شعایی خرپا، از مرکز به جانب به طول ۸ متر و زاویه بین خرپاهای سقف در یک دهانه از گلخانه ۴۵ درجه است. ارتفاع ستون مرکزی ۶ متر و همچنین ارتفاع ستون‌های فرعی گلخانه ۴ متر و ارتفاع ستون کنج نیز ۳ متر در طراحی این گلخانه محاسبه شده است. در تحلیل سیالاتی جریان هوای داخل گلخانه، معادلات حاکم بر سیال تراکم‌پذیر در میدان جریان به‌صورت روابط (۱) تا (۱۴) نوشته می‌شود (Pepper *et al.*, 2014):

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \qquad (۱)$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_j}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{1}{YM^2}p - \frac{1}{3}\frac{\mu}{Re}\frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right) + \frac{\mu}{Re}\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \qquad (۲)$$

$$\frac{\mu}{Re}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\rho\left(\frac{\partial_e}{\partial t}+u_j\ \frac{\partial_e}{\partial x_j}\right) = \frac{\Upsilon}{RePr}\ \frac{\partial}{\partial x_j}\ \mu\frac{\partial_e}{\partial x_j} - \left(\ \frac{1}{\Upsilon M^2}p+\frac{2}{3}\frac{\mu}{Re}\frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right)+\ \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\mu}{Re}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$ (۳)

$$\mathrm{P} = \rho \mathrm{e}$$ (۴)

رابطه (۱) معادله پیوستگی، رابطه (۲) معادله مومنتوم، رابطه (۳) معادله انرژی و رابطه (۴) معادله حالت ماده هستند. در روابط (۱) تا (۴)؛ $u[m.s^{-1}]$ میدان سرعت، $x\ [m]$ موقعیت ذره در راستای محور x ها، ρ $[kg.m^{-3}]$ چگالی ماده، $\mathrm{P}\ [Pa]$ فشار و $e\ \ [J.kg^{-1}]$ انرژی داخلی سیستم در یکای سیستم متریک هستند. میزان ویسکوزیته جریان سیال ($\mu[Pa.s]$) که وابسته به درجه حرارت ($\mathrm{T}[°K]$) است، با استفاده از قوانین ساترلند ویلکویکس[1] به‌صورت رابطه (۵)، بیان می‌شود (Wilcox *et al.*, 2006):

$$\mu = T^{3/2}\ \frac{1+S}{T+S}$$ (۵)

در این رابطه S مقداری ثابت و بدون بعد است. عدد رینولدز[2] (Re)، عدد پرانتل[3] (Pr)، عدد تطبیق[4] (M) و نسبت حرارتی ویژه[5] (γ) نیز به‌صورت روابط (۶) تا (۹) بیان می‌شوند:

$$Re = \frac{\rho_\infty U_\infty L}{\mu_\infty}$$ (۶)

$$Pr = \frac{\mu_\infty C_p}{k_\infty}$$ (۷)

$$\mathrm{M} = \frac{U_\infty}{\sqrt{\gamma\frac{p_\infty}{\rho_\infty}}}$$ (۸)

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$ (۹)

در این روابط کمیت‌های چگالی حدی ($\rho_\infty[kg.m^{-3}]$)، سرعت جریان سیال در دور دست ($U_\infty[m.s^{-1}]$) ویسکوزیته دینامیک ($\mu_\infty([Pa.s]$)، طول موثر جریان ($L[m]$)، ضریب هدایت گرمایی ($k_\infty[W.m^{-1}.k]$) و فشار جریان در دوردست ($p_\infty[Pa]$) مقادیر مرجع مربوط به جریان سیال هستند. $[J.kg^{-1}.K]$ C_p و C_v نیز به‌ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه سیال در فشار و حجم ثابت هستند.

به‌منظور تخمین توابع چگالی، سرعت، دما و فشار، از روابط (۱۰) تا (۱۴) (به‌ترتیب معادلات پیوستگی، مومنتوم-x، مومنتوم-y، انرژی و حالت) (William *et al.*, 1999) استفاده شد:

$$\int N_i \frac{\partial\rho}{\partial t}\mathrm{d}\Omega = -\int \left(W_\rho\right)_i \left(u\frac{\partial\rho}{\partial x}+v\frac{\partial\rho}{\partial y}\right)\mathrm{d}\Omega - \int N_i\,\rho\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)\mathrm{d}\Omega$$ (۱۰)

$$\int \rho N_i\ \frac{\partial u}{\partial t}\ \mathrm{d}\Omega\ = -\int\left[(W_u)_i\ \left[u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right]+ \frac{\mu}{Re}\left(\frac{\partial N_i}{\partial x}\ \frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial N_i}{\partial y}\ \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right]\ \mathrm{d}\Omega + \int\frac{\partial N_i}{\partial x}\left[\frac{1}{\Upsilon M^2}p-\frac{1}{3}\frac{\mu}{Re}\ \left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right]\ \mathrm{d}\Omega + \int N_i\left[-\frac{1}{\Upsilon M^2}p-\frac{1}{3}\frac{\mu}{Re}\ \left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right]\ n_x d\Gamma + \int N_i\frac{\mu}{Re}\left[2\frac{\partial u}{\partial x}n_X+\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)n_y\right]\ d\Gamma$$ (۱۱)

$$\int \rho\, N_i\ \frac{\partial v}{\partial t}\ \mathrm{d}\Omega\ = -\int\left[(W_v)_i\ \left[u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right]+ \frac{\mu}{Re}\left(\frac{\partial N_i}{\partial x}\ \frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial N_i}{\partial y}\ \frac{\partial v}{\partial y}\right)\right]\mathrm{d}\Omega + \int\frac{\partial N_i}{\partial y}\left[\frac{1}{\Upsilon M^2}p-\frac{1}{3}\frac{\mu}{Re}\ \left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right]\ \mathrm{d}\Omega + \int N_i\left[-\frac{1}{\Upsilon M^2}p+\frac{1}{3}\frac{\mu}{Re}\ \left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right]\ n_y d\Gamma + \int N_i\frac{\mu}{Re}\left[2\frac{\partial v}{\partial y}n_y+\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)n_x\right]\ d\Gamma$$ (۱۲)

$$\int p\, N_i\frac{\partial e}{\partial t}\mathrm{d}\Omega = -\int\left[(W_e)_i\ \left[u\frac{\partial e}{\partial x}+v\frac{\partial e}{\partial y}\right]+ \frac{\gamma\mu}{RePr}\left(\frac{\partial N_i}{\partial x}\ \frac{\partial e}{\partial x}+\frac{\partial N_i}{\partial y}\ \frac{\partial e}{\partial y}\right)\right]\mathrm{d}\Omega\ \int N_i\left[\frac{1}{\Upsilon M^2}p+\frac{2}{3}\frac{\mu}{Re}\ \left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right]\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)\mathrm{d}\Omega\ \int N_i\frac{\mu}{Re}\ \left[2\ \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+2\ \left(\frac{\partial v^2}{\partial y}\right)+\frac{\partial u}{\partial y}\ +\frac{\partial v}{\partial x}\right]\mathrm{d}\Omega + \int N_i\frac{\gamma\mu}{RePr}\left(\frac{\partial e}{\partial x}\ n_x+\frac{\partial e}{\partial y}\ n_y\right)d\Gamma$$ (۱۳)

$$\int M_i p d\Omega = \int \rho\, M_i e d$$ (۱۴)

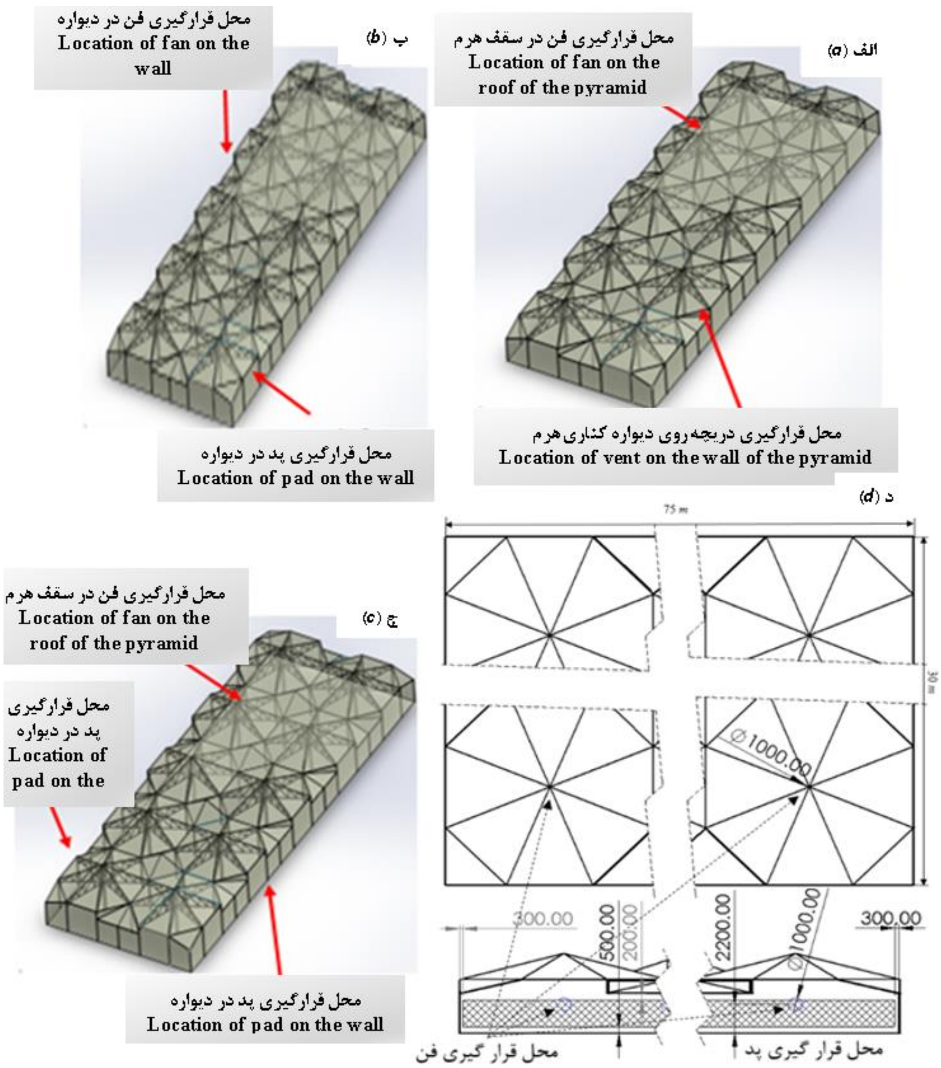
در این روابط N_i تابع شکل و M_i تـابع شـکل بـا مقـدار ثابـت-تکه‌ای است به‌طوری‌که روی المان e_i ام مقدار $M_i = 1$ و در خـارج از المان مورد نظر $M_i = 0$ اسـت. در ایـن پـژوهش بـه‌منظـور حـل معادلات جریان سیال از روش حجم محدود[6] استفاده شد(Alakashi *et al.*, 2015).باید توجه داشت که بر اساس تحقیقـات انجـام شـده، سطح بازشوندگی دریچه‌های گلخانـه بایـد بـه‌گونـه‌ای باشـد کـه در صورت وزش ملایم باد[7]، در تهویـه طبیعـی (اسـتفاده از دریچـه‌هـای سقفی و جانبی) در مدت یک ساعت هوای داخـل گلخانـه بـا هـوای بیرون ۳۰ بار تعویض شود (Fuchs, 2006). در صورت تهویه اجباری (استفاده از دریچه‌های، سقفی و جانبی به همراه فن‌های تخلیـه هـوا) نیز در مدت یک ساعت هوای داخل گلخانه با هـوای بیـرون ۶۰ بـار تعویض شود (Walker, 1965). همچنین حـداکثر تعـداد فـن جهـت تهویه برای گلخانه چند دهانه (۵×۲) باید به‌گونه‌ای بهینه شود تا موج تهویه یکنواخت در سرتاسر گلخانه وجود داشته باشـد (Santolini *et al.*, 2018). سرعت هوا در هنگام خروج از فن‌های گلخانـه‌ای غالبـاً

1- Sutherland and Wilcox
2- Reynolds Number
3- Prandtl Number
4- Flow Match Number
5- Heat Capacity Ratio

6- Finite Volume

۷- به بادی که سرعت آن در حدود ۱ تا ۲ متر بر ثانیه باشد باد ملایم گفته می‌شود.

بین ۲ تا ۱۰ متر بر ثانیه قرار دارد که مبنای محاسبات انجام شـده در این مقاله است (Buffington *et al.*, 2016).



شکل ۱– نمای ایزومتریک گلخانه هشت‌وجهی با تهویه به روش (الف) استفاده از فن در سقف هرم‌های گلخانه و دریچه در دیواره‌های هرم، (ب) پد و فن روبه‌روی هم در دیوارهای جانبی گلخانه، (ج) فن در سقف هرم‌ها و پد در دیوارهای جانبی گلخانه و (د) نقشه اندازه و محل قرارگیری پدها و فن‌ها هنگامی‌که فن‌ها در سقف و روی دیواره مقابل پدها جانمایی شده‌اند.

Fig.1. The isometric view of the octagonal greenhouse with ventilation methods of (a) fans on the roofs of the pyramids and vents on the walls of pyramyds, (b) pads and fans on the greenhouse side walls, (c) pads on the greenhouse side walls and fans on the roofs of the pyramids and (d) the layout of size and location of pads and fans when the fans are positioned on the roof and on the wall in front of the pads.

در این تحقیق، مکش هر فن بر اساس مـدل تجـاری موجـود در بازار در نظر گرفته شده اسـت. قطـر بـزرگ پروانـه در فـن انتخـابی، نزدیک به یک متر است که قدرت تخلیـه‌ای برابـر بـا حـدود ۳۴۰۰۰ $[m^3.h^{-1}]$ دارد. با در نظر گرفتن ارتفاع متوسط سقف به انـدازه ۴/۵ متر و در نتیجه حجم گلخانه به اندازه ۱۰۱۲۵ مترمکعـب، تعـداد فـن مورد نیاز را می‌توان بر اساس روابط مربوط به تهویه آزاد و اجباری در گلخانه‌ها محاسب نمود (Sase, 2006). در ادامه، محاسبات مربوط به انتخاب فن‌های مورد نیاز گلخانه هشت‌وجهی عنوان خواهـد شـد کـه برای هر سه طرح جانمایی صادق است. نـرخ تهویـه $V_E[m.h^{-1}]$ را می‌توان بر اساس نرخ جریان تهویه $V_V[m^3.h^{-1}]$ و مساحت گلخانه $A_G = 70 \times 35[m^2]$، از رابطه (۱۵) محاسـبه نمـود (Zabeltitz, 1999; Zabeltitz, 1986):

$$V_E = V_V/A_G[m.h^{-1}] \quad (۱۵)$$

در تهویه آزاد، رابطه تعداد دفعات تعویض هوا بر اساس حجم گلخانه $V_G[m^3]$، به‌صورت رابطه (۱۶) نوشته می‌شود:

$$N = V_V/V_G[m.h^{-1}] \quad (۱۶)$$

برای محاسبه نرخ تهویه گلخانه، علاوه بر رابطه (۱۵)، می‌توان با استفاده از ارتفاع متوسط گلخانه $h[m]$، از رابطه (۱۷) نیز استفاده کرد.

$$V_E = h \times N \quad (۱۷)$$

باید در نظر داشت که محاسبه V_E به‌عنوان یک پارامتر مهم در نگه داشتن اختلاف دمایی بین داخل و خارج گلخانه در هر دو حالت تهویه آزاد و اجباری ضروری است. این پارامتر را می‌توان از روابط مربوط به موازنه انرژی محاسبه نمود (Zabeltitz, 1986). راندمان تهویه گلخانه نیز بر اساس رابطه نرخ جریان تهویه و مساحت دریچه‌های گلخانه $A_V[m^2]$ و یا بر اساس تعداد دفعات تعویض به شکل روابط (۱۸) و (۱۹) نوشته می‌شوند (Bartzanas *et al.*, 2004):

$$V_{eff} = V_V/A_V[m.h^{-1}] \quad (۱۸)$$

$$V_{eff} = N/A_V[m^{-2}h] \quad (۱۹)$$

سرعت باد به طور کلی در داخل گلخانه نباید از $[m/s]$ ۱ بیشتر شده و در یک حالت مناسب می‌توان آن را به اندازه $[m.s^{-1}]$ ۰/۵ انتخاب نمود. برای تخلیه کامل گلخانه بر اساس تعداد دفعات مورد نیاز هوا و انتخاب تعداد فن، می‌توان حجم گلخانه را برابر با ظرفیت تخلیه فن‌ها قرار داد و از رابطه (۲۰) تعداد فن مورد نیاز را محاسبه نمود. در این حالت خواهیم داشت:

$$n = (V_G \times N)/Q_f \quad (۲۰)$$

در رابطه (۲۰)، $Q_f[m^3.h^{-1}]$ دبی تخلیه فن و n تعداد فن مورد نیاز است. برای گلخانه هشت‌وجهی که هدف افزایش زمان ماندگاری گازهای تزریقی پیرامون گیاه مانند دی‌اکسیدکربن، در تهویه اجباری است، تعداد دفعات تعویض هوا، $N = 30$ بار در ساعت در نظر گرفته شده است. با احتساب دبی تخلیه فن‌ها به اندازه $[m^3.h^{-1}]$۳۴۰۰۰، تعداد حداقل ۹ فن مطلوب خواهد بود. در جانمایی فن‌ها باید توجه داشت که فاصله بین دو فن مجاور نباید از ۱۲ متر بیشتر باشد. در طراحی گلخانه هشت‌وجهی، این مقدار، هنگامی‌که فن‌ها در راس هرم سقف و دیواره جانبی گلخانه جانمایی شده‌اند کمتر از ۱۰ متر است. در گلخانه‌ها، سطح دریچه‌های ورود هوا حداقل ۱/۲۵ برابر سطح دریچه‌های فن در نظر گرفته می‌شوند و سرعت هوا نیز در داخل گلخانه نباید از یک متر بر ثانیه تجاوز کند. در چیدمان فن در سقف هرم‌های گلخانه و دریچه در دیواره‌های هرم، مساحت هر دریچه در دیواره هرم برابر با ۱/۵ متر مربع است. با توجه به این‌که تعداد ۲۰ دریچه در کل گلخانه در نظر گرفته شده و سطح دریچه هر فن کمتر از یک متر مربع است، لذا سطح کل دریچه‌های ورودی بیش از ۳ برابر دریچه‌های فن‌ها خواهد بود. همچنین پدها به گونه‌ای قرار داده شده که از ارتفاع ۷۰ سانتی‌متری سطح زمین تا ۲۰ سانتی‌متری زیر تیر سقف، سرتاسر دیوار گلخانه را به طول ۷۴ متر (نیم متر کمتر از هر دیواره پیشانی گلخانه به دلیل ملزومات نصب) پوشانده‌اند (شکل ۱). در این حالت سطح پد به‌کار رفته برای هر دیواره، ۱۵۷/۵متر مربع لحاظ خواهد شد. در حالت استفاده از پد، با انشعاب لوله‌های آب‌رسانی به پدها، استفاده از یک پمپ مناسب می‌تواند کافی باشد. به ازای هر متر از طول پد سلولزی ۱۰ سانتی‌متری، آب باید با سرعتی معادل ۲/۶ لیتر در دقیقه به بالا انتقال یابد. از آنجا که در گلخانه هشت‌وجهی، طول پد بیشتر از ۵۰ متر است، لذا ۸/۴۵۸ لیتر آب دردقیقه برای ۷۴ متر طول پد لازم خواهد بود که در حالت پد در دوطرف، این مقدار دو برابر خواهد بود. اگر توان موتور فن‌ها ۱/۵ اسب و جریان مصرفی آن‌ها ۲/۸ آمپر در نظر گرفته شود، با توجه به تعداد ۹ (برای حالت فن در دیواره) و ۱۰ (برای حالت فن در سقف) فن، مصرف جریان برق حداکثر ۲۸ آمپر خواهد بود که اگر جریان مصرفی برق پمپ ۱۰ آمپر باشد، در مجموع ۳۸ آمپر برق مصرف خواهد شد. با توجه به مراجع موجود (Anonymous, 2003; Kittas *et al.*, 2003) برای گلخانه با سطحی کمتر از ۲۷۰۰ متر مربع، مصرف برق کمتر از ۵۰ آمپر مناسب خواهد بود. لازم به ذکر است که برای مدل‌سازی نحوه حرکت سیال، کلیه پارامترهای لازم و وابسته به اقلیم، بر اساس غلظت و فشار هوا در سطح دریای آزاد در نظر گرفته شدند. برای مدل‌سازی لازم، در ابتدا هندسه حاکم بر مسأله ساخته و مش‌بندی شد؛ سپس جریان باد داخل گلخانه توسط محسبات سیالاتی و با استفاده از نرم‌افزار سالیدورک شبیه‌سازی جریان سیال[1] ۲۰۱۸ شبیه‌سازی شد. در این شبیه‌سازی، جریان به‌طور کامل به‌صورت لایه‌ای و نوع مش‌های انتخابی به‌صورت مربعی چندوجهی در نظر گرفته شده که بر روی نواحی مرزی به‌صورت مثلثی و هرمی است. ابتدا چند سایز مش در نظر گرفته شد و پس از چندین بار اجرای برنامه و زمانی‌که دیگر کوچک نمودن مش‌ها تغییر قابل‌توجهی در پاسخ مربوط به سرعت ایجاد نکرد، مش مطلوب انتخاب گردید و شکل‌ها بر اساس آن استخراج شد. تعداد ۳.۷۶۲.۴۹۳ المان در مدل‌سازی جریان چرخشی فن در سقف و ۲.۲۱۵.۸۰۵ المان در مدل‌سازی جریان مستقیم با پد و فن و پدها در کنار و فن در سقف به‌کار رفته است. معادلات حاکم بر جریان سیال به‌صورت عددی و با استفاده از حجم محدود در نرم‌افزار مورد نظر حل شده‌اند.

با توجه به قیود عنوان شده برای جانمایی فن‌ها در گلخانه‌ها، باید به این موضوع نیز اشاره نمود که جهت در نظر گرفتن مسائل مربوط به کاهش مصرف انرژی، در صورت عدم نیاز، لازم نیست که همگی فن‌ها هم‌زمان روشن یا خاموش شوند. تهویه یک گلخانه به عوامل مختلفی بستگی دارد که از آن جمله می‌توان به دمای هوا، انرژی تابش و میزان تبخیر و تعرق و رطوبت هوای داخل گلخانه اشاره نمود. بهترین حالت برای روشن و خاموش نمودن فن‌ها پس از جانمایی صحیح آن‌ها، استفاده از سیستم‌های کنترل گلخانه است. به

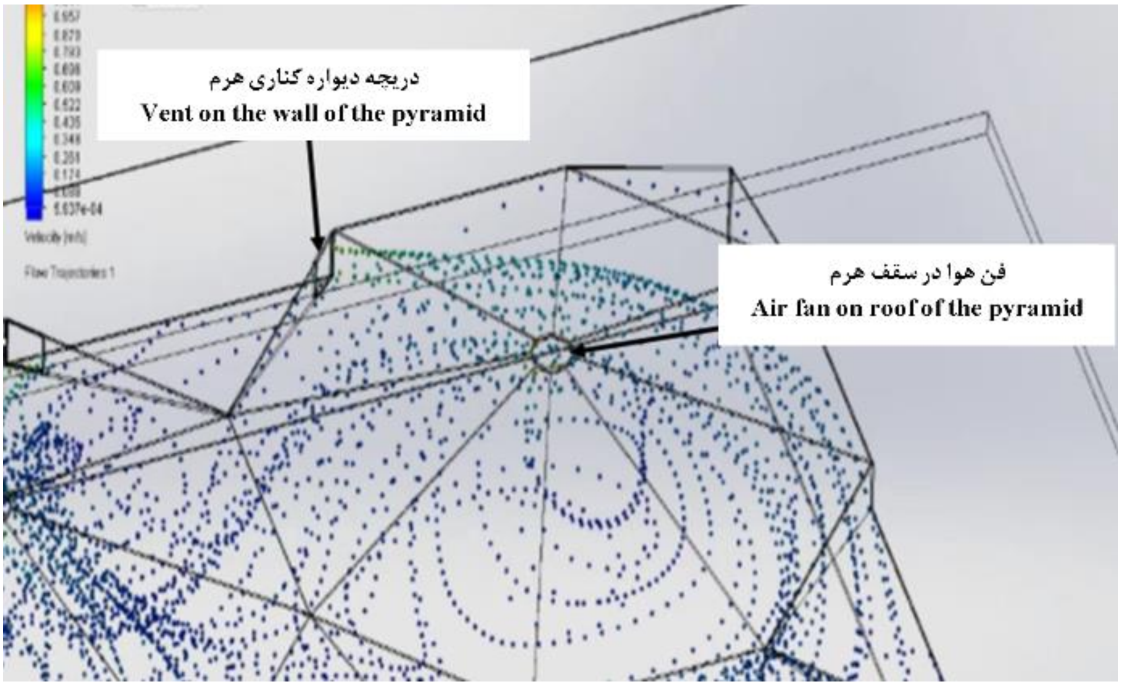
1– Solidworks flow simulation

این صورت که با استفاده از نصب حسگرهای دما در نقاط مختلف گلخانه، فن‌هایی روشن شوند که دمای نواحی گرم گلخانه را به کمک پد، پایین آورند. با استفاده از سیستم‌های کنترل و حسگرها، دیگر لازم نیست که تمام فن‌ها هم‌زمان شروع به‌کار کنند. این موضوع کمک شایانی در کاهش مصرف انرژی و استهلاک فن‌ها خواهد داشت. بدیهی است که هرچه اختلاف بین دمای خارج و مطلوب برای داخل گلخانه بیشتر باشد، انرژی بیشتری نیز برای جبران و کاهش این اختلاف دمایی نیاز خواهد بود. در گلخانه‌هایی که پد و فن روبه‌روی یکدیگر قرار دارند، پیشنهاد می‌شود که در گرم‌ترین و آفتابی‌ترین روزهای کشت، اختلاف دمایی بین داخل و خارج گلخانه را در حالت تمام فن‌ها روشن و حالت همگی خاموش حساب نمایند. با استفاده از این الگو، توانایی فن‌ها در ایجاد سرمایش گلخانه به‌دست می‌آید. سپس با محاسبه اختلاف دمایی داخل و خارج گلخانه در روزهای دیگر می‌توان تعداد فنی که باید در دماهای مختلف روشن باقی بماند را محاسبه نمود. البته الگوی ساده‌تری نیز برای روشن نمودن فن‌ها وجود دارد و آن روشن نمودن متوالی فن‌ها است. در این حالت ابتدا فن‌ها یکی درمیان روشن شده و دمای گلخانه برآورد می‌شود. اگر تعداد فن‌ها کافی نبود مابقی فن‌ها نیز روشن خواهد شد. مجدد اگر نیاز به کاهش دما بود، پمپ روی پدها نیز روشن می‌گردد. با این الگو مصرف انرژی به میزان قابل‌توجهی کاهش پیدا خواهد نمود.

نتایج و بحث

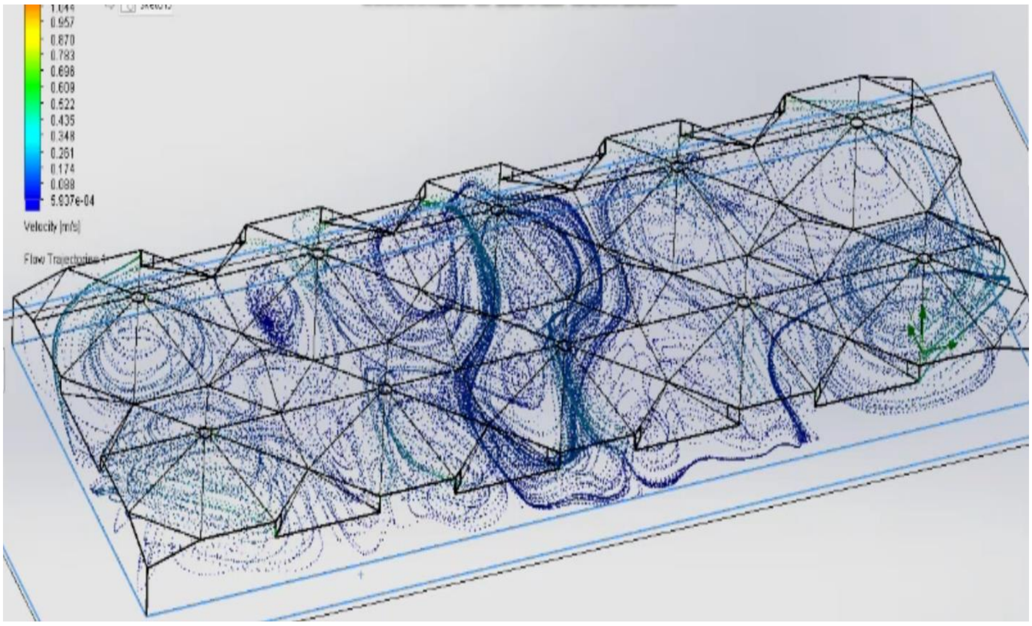
مدل‌سازی جریان باد در حالت تهویه با استفاده از فن‌ها در سقف هرم‌ها و دریچه‌ها در دیواره هرم‌ها

نتایج مدل‌سازی در حالتی که فن‌ها در سقف هرم‌ها و دریچه‌ها در دیواره هرم‌ها قرار دارد در شکل‌های ۲ تا ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که با تغییر سرعت تهویه ناشی از افزایش سرعت فن‌های تخلیه هوا در سقف، شکل پروفیل باد نیز در داخل گلخانه متفاوت خواهد بود که به دلیل باز بودن فضای داخل این گلخانه، این موضوع قابل پیش‌بینی است. این تفاوت به‌خوبی با مقایسه نتیجه مدل‌سازی تغییر سرعت خروج هوا از فن سقف قابل درک است. شکل‌های ۲ و ۳ نیمرخ حرکت باد با سرعت خروج ۲ متر بر ثانیه را به‌ترتیب از نمای سه بعدی عرضی و طولی در داخل گلخانه نشان می‌دهد و شکل‌های ۴ و ۵ نیمرخ حرکت باد با سرعت خروج ۱۰ متر بر ثانیه را به‌ترتیب از نمای سه بعدی عرضی و طولی در داخل گلخانه نشان می‌دهد.



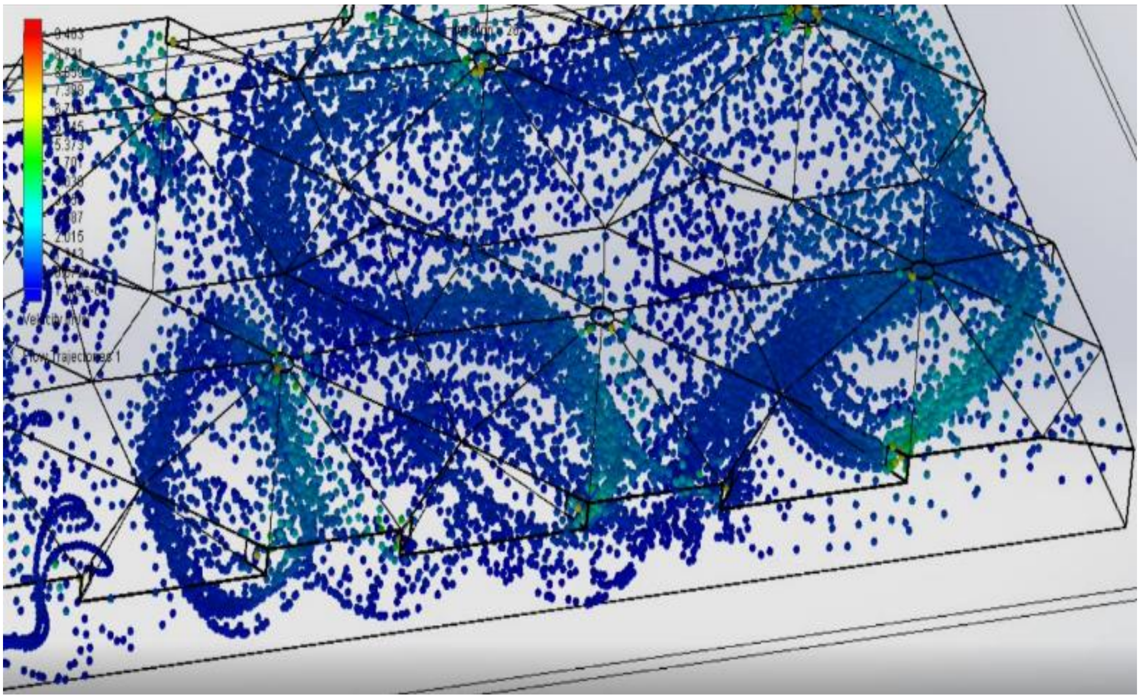
شکل ۲- پروفیل حرکت باد با سرعت خروج ۲ متر بر ثانیه از نمای سه‌بعدی عرضی در داخل گلخانه

Fig.2. The wind profile with 2 $m.s^{-1}$ exit velosity from a transverse three-dimensional view of inside the greenhouse



شکل ۳- پروفیل حرکت باد با سرعت خروج ۲ متر بر ثانیه از نمای سه‌بعدی طولی در داخل گلخانه

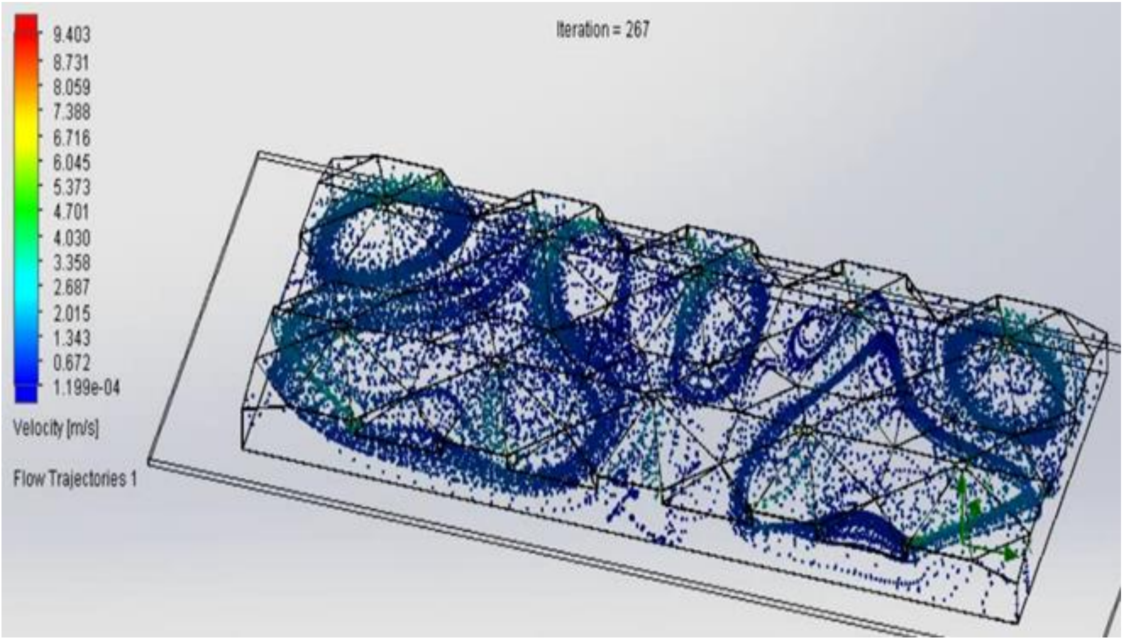
Fig.3. The wind profile with 2 $m.s^{-1}$ exit velosity from a longitudinal three-dimensional view of inside the greenhouse



شکل ٤- پروفیل حرکت باد با سرعت خروج ۱۰ متر بر ثانیه از نمای سه‌بعدی عرضی در داخل گلخانه

Fig.4. The wind profile with 10 $m.s^{-1}$ exit velosity of from a transverse three-dimensional view of inside the greenhouse

نکته قابل‌توجه این است که هرچه‌قدر سرعت خروج هوا از سقف افزایش پیدا کند، خطوط جریان دورانی هوا در داخل گلخانه نیز از تراکم بیشتری برخوردار خواهند شد. به همین دلیل با تغییر سرعت دورانی فن و کنترل خروج هوا از فن سقفی، می‌توان پروفیل سرعت وزش باد در داخل گلخانه را به حالتی مطلوب رساند.



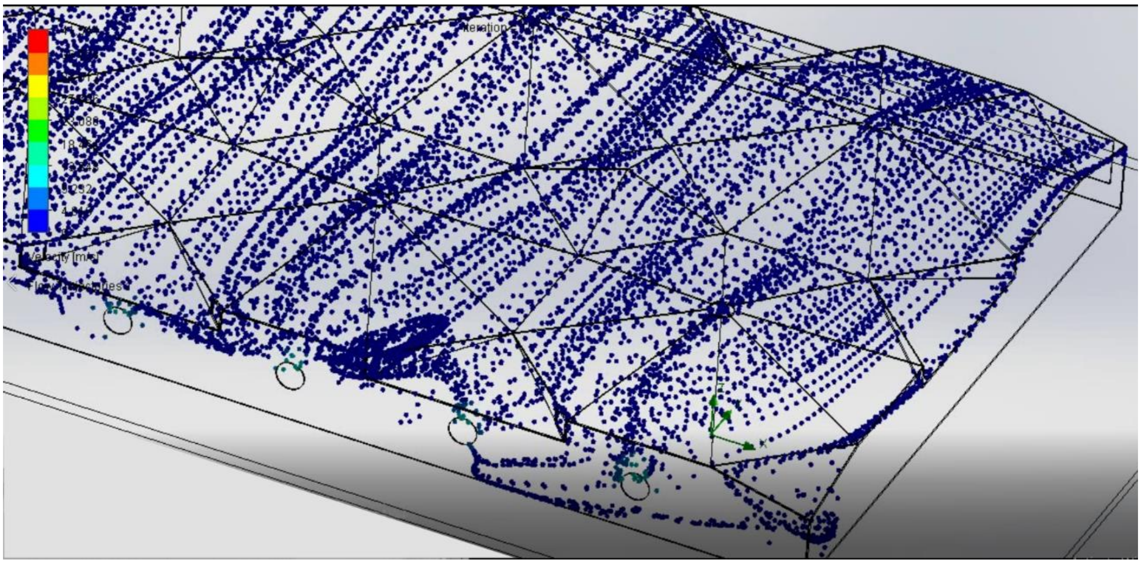
شکل ۵- پروفیل حرکت باد با سرعت خروج ۱۰ متر بر ثانیه از نمای سه‌بعدی طولی در داخل گلخانه

Fig.5. The wind profile with 10 $m.s^{-1}$ exit velosity from a longitudinal three-dimensional view of inside the greenhouse

مدل‌سازی جریان باد هنگام استفاده از فن و پد روبه‌روی هم

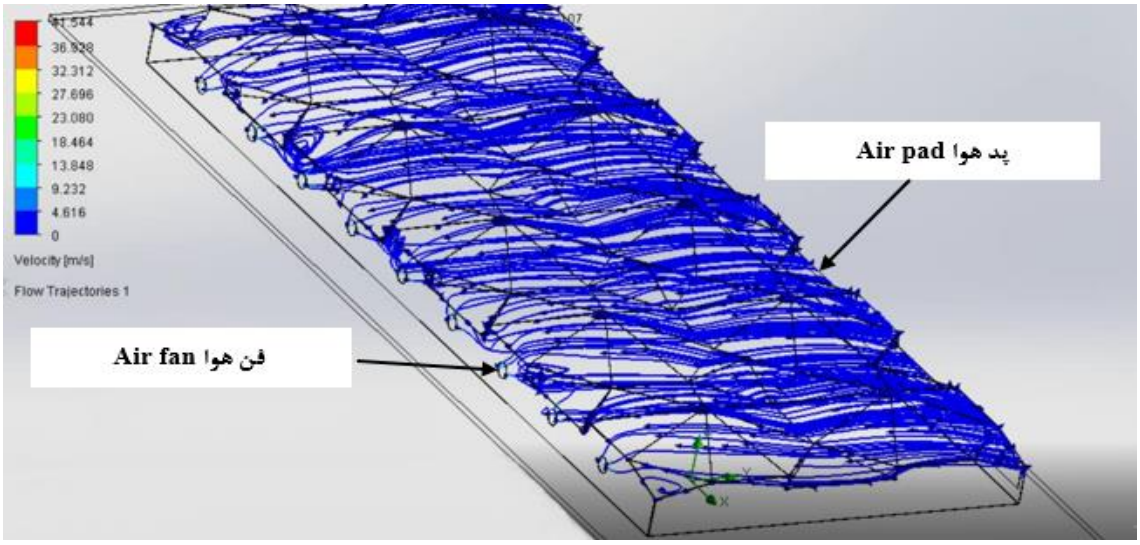
در بیشتر موارد، هدف از طراحی سیستم تهویه اجباری در گلخانه، ایجاد یک جریان ملایم و یکنواختی از هوا داخل گلخانه است. متداول‌ترین حالت برای ایجاد جریان یکنواخت هوا همراه با سرمایش در داخل گلخانه‌ها، استفاده از سامانه فن و پد است (Franco *et al.*, 2014). بدین‌صورت که پدها در یک طرف دیواره گلخانه و فن‌ها در طرف مقابل آن نصب می‌گردند. در اثر مکش فن‌ها، هوای بیرون گلخانه از میان پدها عبور نموده و خنک می‌شود. سپس به داخل گلخانه امتداد یافته و ضمن حرکت در طول گلخانه و تبادل دما با محیط گلخانه، در نهایت از فن‌ها خارج خواهد شد (Chan *et al.*, 2014). طول گلخانه‌ها از نظر عملکرد و کارایی سامانه‌های سرمایشی پد و فن اهمیت دارد. به‌طور معمول فاصله پد از فن باید ۳۰ تا ۴۵ متر باشد (Anonymous, 2003; Kittas *et al.*, 2003). در طول‌های کمتر از این دامنه، فرصت کافی برای تبادل گرما بین هوای خنک عبور کرده از پد و هوای گرم درون گلخانه به‌وجود نمی‌آید. همچنین در طول‌های بیشتر از این دامنه، حجم و دمای هوای خنک عبور کرده از پد، توان خنک‌سازی حجم هوای داخل گلخانه را در طول عبور و خارج شدن به‌وسیله فن نخواهد داشت. در عمل، طول گلخانه تعیین‌کننده این فاصله است. برای گلخانه‌هایی با طول زیاد، نصب فن‌های سقفی در وسط طول گلخانه و قرار دادن پدها در دو طرف گلخانه، پذیرفتنی است (Zarei, 2017).

هندسه سازه گلخانه‌ای هشت‌وجهی چند قلوی مورد نظر در این‌جا به‌گونه‌ای است که فاصله بین فن و پد مقابل آن در حدود ۳۰ متر است (شکل ۷). نتایج بررسی دینامیک سیالات محاسباتی، نشان داد که در مدل‌سازی جریان باد با استفاده از فن و پد، تعداد ۹ فن با قطر پروانه یک متر، مقدار جریانی مطلوب برای محصولات در این گلخانه ایجاد خواهد کرد تا با توجه به طول ۷۰ متری گلخانه و سرعت جریان هوا هنگام خروج از فن (حدود ۲ متر بر ثانیه) نیمرخ یکنواختی در انتهای دیواره نزدیک به فن ایجاد شده و جریان هوای تازه به گیاهان آن بخش گلخانه برسد (شکل ۷). شکل‌های ۶ و ۷ مدل‌سازی دینامیک سیالاتی ذرات و خطوط جریان هوا را در گلخانه هشت‌وجهی مورد بررسی برای حالتی که فن و پد در دو دیوار مقابل گلخانه قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در این حالت، جریان هوا در داخل گلخانه کاملاً یکنواخت و سرعت آن کمتر از ۲ متر بر ثانیه است. با مشاهده نتایج مدل‌سازی صورت گرفته، می‌توان گفت که این گلخانه از لحاظ سرمایش و تهویه با سیستم پد و فن، به‌خوبی می‌تواند شرایط استاندارد تهویه و سرمایش را ایجاد نماید.



شکل ٦- مدل‌سازی حرکت ذرات هوای داخل گلخانه با جانمایی پد و فن در دیواره جانبی گلخانه

Fig.6. Air particles movement modeling inside the greenhouse by locating the pad and fan on the greenhouse side walls



شکل ۷- مدل‌سازی خطوط جریان یکنواخت تهویه با جانمایی پد و فن در دیواره جانبی گلخانه

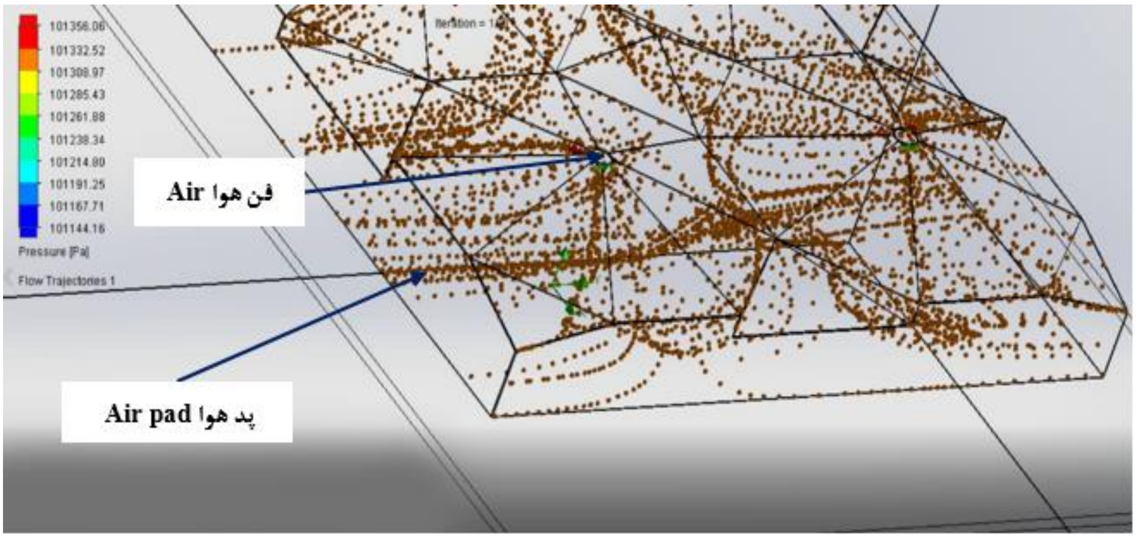
Fig.7. Flow lines modeling for ventilation by locating the pad and fan on the greenhouse side walls

مدل‌سازی جریان باد هنگام استفاده از فن در سقف هرم‌ها و پد در دیوارهای طولی گلخانه

نتایج مدل‌سازی فن در سقف هرم‌ها و جانمایی پد در دیوارهای طولی گلخانه که باعث افزایش رطوبت می‌شود، نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که گلخانه هشت‌وجهی مورد نظر، قادر است تا با استفاده از سایبان و توری‌های سایه‌انداز، برای سرمایش در مناطقی با آب و هوای بسیار خشک و بدون استفاده از سیستم مه‌پاش نیز به‌کار رود. در این حالت هر دو دیواره طولی گلخانه پدگذاری شده و فن‌ها مجدداً در نوک هرم سقف جانمایی می‌شوند. برای بالا بردن راندمان سرمایشی پد و فن گلخانه‌ها می‌توان از سایه‌اندازها روی سقف و یا در منطقه کراب بار استفاده نمود. این عمل باعث کاهش جذب انرژی تابشی شده و در نتیجه مانع از بالا رفتن دمای ذرات معلق آب موجود در هوای گلخانه به‌ویژه روی پدها می‌شود. لذا سرمایش حاصله ناشی از مکانیزم پد و فن افزایش می‌یابد. در شبیه‌سازی حالت پدها در دیواره کنار و فن در راس سقف هرم، به‌دلیل این‌که تعداد پدها دوبرابر و در دو طرف جانمایی شده است، انتظار می‌رود که با ثابت ماندن شرایط محیطی، میزان ایجاد رطوبت نیز در گلخانه افزایش یابد. با فرض این‌که رطوبت حتی نزدیک به بخار اشباع هم نیست و

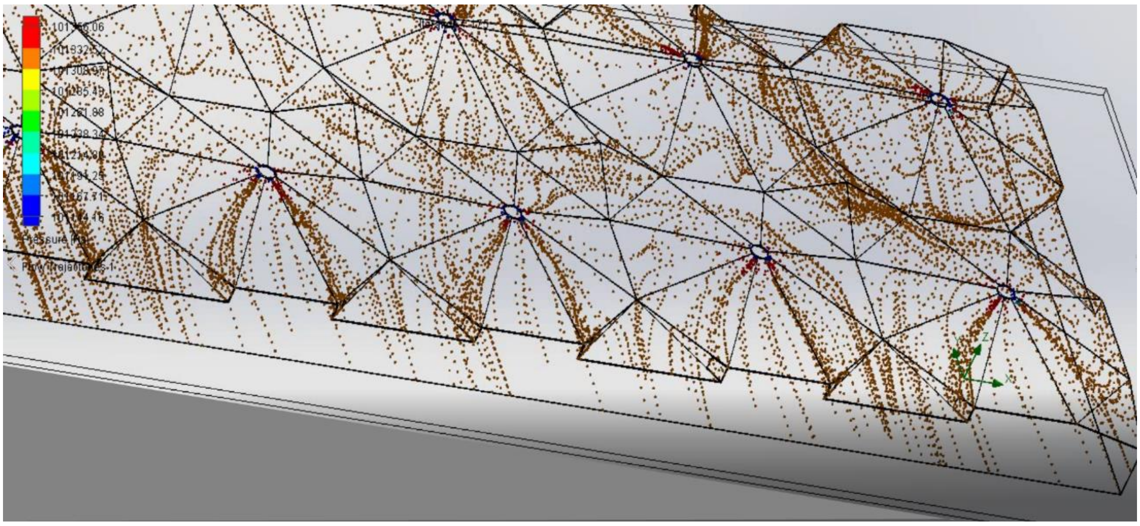
سایه‌اندازها مانع از جذب انرژی خورشید و بالا رفتن دمای محیط شده‌اند، لذا میزان ایجاد سرمایش با استفاده از این مکانیزم افزایش پیدا خواهد کرد. اگر رطوبت در محیط بالا باشد، دمای ذرات معلق آب در هوا که تحت تاثیر تابش مستقیم نور خورشید قرار دارند، بالا رفته و از آنجا که ظرفیت حرارتی آب نسبت به هوا بیشتر است، انرژی بیشتری برای سرد نمودن توده هوایی گرم مرطوب محیط بیرون نیاز خواهد شد و در نتیجه راندمان پدها به شدت کاهش پیدا خواهد کرد.

شکل‌های ۸ و ۹ به‌ترتیب نماهای دوقلو و چندقلو از گلخانه هشت‌وجهی را برای این حالت نمایش می‌دهند. در مقایسه با دو حالت قبلی می‌توان دید که این مدل از سرمایش، قادر است تا جریان هوای یکنواختی را ایجاد نموده و از طرف دیگر نرخ رطوبت‌زنی به هوا را در مقایسه با حالت یک طرف پد و یک طرف فن، تا حدود ۱/۷ برابر در شرایط یکسان افزایش دهد. بدیهی است با توجه به اقلیم خشک اغلب مناطق کشور (وجود رطوبت‌نسبی پایین در بیشتر ماه‌های سال)، می‌توان دمای گلخانه را با استفاده از این مکانیزم سرمایش تا حد قابل‌توجهی پایین آورد. همچنین استفاده از پرده‌های سایه‌انداز نیز می‌تواند برای جلوگیری از افزایش دما و کاهش رطوبت‌نسبی در گلخانه، بسیار مفید واقع شوند.



شکل ۸– مدل‌سازی حرکت ذرات هوای داخل گلخانه با جانمایی پدها در دو دیواره طولی مقابل هم و فن‌ها در سقف هرم‌های گلخانه دوقلو

Fig.8. Air particles movement modeling inside the greenhouse by locating the pads on the greenhouse side walls and fans on the roof of the pyramids for two-span view



شکل ۹– مدل‌سازی حرکت ذرات هوای داخل گلخانه با جانمایی پدها در دو دیواره طولی مقابل هم و فن‌ها در سقف هرم‌های گلخانه چندقلو

Fig.9. Air particles inside the greenhouse by locating the pads on the greenhouse side walls and fans on the roof of the pyramids for multy-span view

نتیجه‌گیری

در این مقاله، شبیه‌سازی دینامیک سیالاتی برای گلخانه هشت‌وجهی پیشنهاد شده، در سه حالت فن‌ها در سقف هرم و دریچه‌ها در دیواره هرم‌ها، فن و پد روبه‌روی هم روی دیوارها و فن در سقف هرم‌ها و پد در دیواره‌های طولی گلخانه با موفقیت انجام شد. بررسی نتایج نشان دادند که این گلخانه با فرم دریچه خاص خود، قابلیت به چرخش درآوردن باد درون گلخانه را دارد که با توجه به قدرت کشش فن‌ها، شکل و سرعت چرخش هوا در داخل متفاوت خواهد بود و بسته به نیاز گلخانه، قابل تنظیم است. هنگام استفاده از فن و پد روبه‌روی هم، مشاهده شد که چگونه جریان یکنواخت باد عبوری از پد، به‌صورت یکنواخت در گلخانه جریان پیدا کرده و از فن‌های مقابل خارج می‌شود. همچنین نتایج نشان دادند که هندسه این گلخانه و فاصله تقریبی سی‌متری بین پد و فن، منجر به ایجاد جریان هوایی مطلوب در گلخانه می‌شود. نتایج نشان دادند که استفاده از پدها به‌صورت موازی (فن‌ها در سقف هرم‌های گلخانه و پدها در دیواره‌های طولی) برای مناطق خشک کاربرد خواهد داشت که این حالت علاوه بر بالا بردن رطوبت، در کاهش دمای هوای داخل گلخانه نیز مؤثر خواهد. نتایج نشان داد که طرح گلخانه هشت‌وجهی به گونه‌ای‌است که با ایجاد جانمایی‌های متفاوتی از پد، فن و دریچه‌ها می‌توان بسته به شرایط آب و هوایی منطقه از این گلخانه استفاده کرد.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از پروژه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی به شماره مصوب ۲۴-۱۴-۱۴-۰۱۴-۹۷۰۲۶۷ می‌باشد که بدین‌وسیله تشکر می‌شود.

References

1. Alakashi, A. M., B. Basuno, and H. T. M. Elkamel. 2015. Comparison between finite volume method (FVM) based on inviscid and viscous flow with experimental and fluent results. Applied and Computational Mathematics 4 (1): 12-17.
2. Anonymous. 2003. Heating, ventilation and cooling greenhouses. ASAE Standard. EP406.4
3. Bartzanas, T., T. Boulard, and C. Kittas. 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. Biosystems Engineering 88 (4): 479-490.
4. Barzegar, R., and M.Yadegari. 2010. Production management in greenhouses. College of Applied Science and the Skill of Agriculture Press. 246 p. (In Farsi).
5. Boulard, T., J. C. Roy, J. B. Pouillard, H. Fatnassi, and A. Grisey. 2017. Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics. Biosystems Engineering 158: 110-133.
6. Buffington, D. E., R. A. Bucklin, R. W. Henley, and D. B. McConnell. 2016. Greenhouse Ventilation. AE-10 Series, UF/IFAS Extension, Gainesville, FL 32611.
7. Cheng, J., D. Qi, A. Katal, L. Wang, and T. Stathopoulos. 2018. Evaluating wind-driven natural ventilation potential for early building design. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 182: 160-169.
8. Chen, J., Y. Cai, F. Xu, H. Hu, and Q. Ai. 2014. Analysis and optimization of the fan-pad evaporative cooling system for greenhouse based on CFD. Advances in Mechanical Engineering. Article ID 712740, 8 pages.
9. Firoozi, S., M. J. Sheikhdavoodi, and S. M. Farani. 2014. Optimizing energy consumption efficiency for greenhouse cucumber production using the data envelopment analysis technique in Lorestan Province of Iran. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research 2: 636-649.
10. Franco, A., D. L. Valera, and A. Pena. 2014. Energy efficiency in greenhouse evaporative cooling techniques: cooling boxes versus cellulose pads. Energies 7: 1427-1447.
11. Fuchs, M., E. Dayan, and E. Presnov. 2006. Evaporative cooling of a ventilated greenhouse rose crop. Agricultural and Forest Meteorology 138 (1-4): 203-215.
12. Ghani, S., F. Bakochristou, E. M. A. E. Bialy, S. M. A. Gamaledin, M. M., Rashwan, A. M. Abdelhalim, and S. Ismail. 2019. Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments- A review. Engineering in Agriculture, Environment and Food 12 (1): 48-70.
13. Ghoulem, M., K. Moueddeb, E. Nehdi, R. Boukhanouf, and J. K. Calautit. 2019. Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. Biosystems Engineering 183: 121-150.
14. He, J., F. Pan, C. S. Cai, A. Chowdhury, and F. Habte. 2018. Progressive failure analysis of low-rise timber buildings under extreme wind events using a DAD approach. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 182: 101-114.
15. Jafari, A. M., M. Solgi, and G. Zarei. 2019. Economic evaluation of artificial lighting in vegetable greenhouses (Case study: Cucumber production in hamadan province). Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture 10 (1): 71-85. (In Farsi).

16. Katsoulas, N., A. Sapounas, F. De Zwart, J. A. Dieleman, and C. Stanghellini. 2015. Reducing ventilation requirements in semi-closed greenhouses increases water use efficiency. Agricultural Water Management 156: 90-99.
17. Kittas, C., T. Bartzanas, and A. Jaffrin. 2003. Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. Biosystems Engineering 85 (1): 87-94.
18. Lee, I., and T. Short. 2001. Verification of computational fluid dynamic temperature simulations in a full-scale naturally ventilated greenhouse. Transactions of the ASAE 44 (1): 119-127.
19. Longo, R., M. Ferrarotti, C. G. Sánchez, M. Derudi, A. Parente. 2017. Advanced turbulence models and boundary conditions for flows around different configurations of ground-mounted buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 167: 160-182.
20. Majdoubi, H., T. Boulard, H. Fatnassi, A. Senhaji, S. Elbahi, H. Demrati, M. Mouqallid, and L. Bouirden. 2016. Canary greenhouse CFD nocturnal climate simulation. Open Journal of Fluid Dynamics 6: 88-100.
21. Majeed, A., A. Zeeshan, and F. M. Noori. 2019. Numerical study of Darcy-Forchheimer model with activation energy subject to chemically reactive species and momentum slip of order two. AIP Advances 9, 045035 :1-11.
22. Mistriotis, A., G. P. A. Bot, P. Picuno, and G. Scarascia-Mugnozza. 1997. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics, Agricultural and Forest Meteorology 85 (3-4): 217-228.
23. Mobtaker, H. G., Y. Ajabshirchi, S. F. Ranjbar, and M. Matloobi. 2017. Investigating the effect of a north wall on energy consumption of an east- west oriented single span greenhouse. Journal of Agricultural Machinery 7 (2): 350-363. (In Farsi).
24. Ould Khaoua, S. A., P .E. Bournet, C. Migeon, T. Boulard, and G. Chassériaux, Analysis of Greenhouse Ventilation Efficiency based on Computational Fluid Dynamics, Biosystems Engineering 95 (1): 83-98.
25. Pepper, D. A., A. Kassab, and E. Divo. 2014. An introduction to finite element, boundary element, and meshless methods with applications to heat transfer and fluid flow. New York, NY: ASME Press.
26. Rasheed, A., J. W. Lee, H. T. Kim, and H. W. Lee. 2019. Efficiency of Different Roof Vent Designs on Natural Ventilation of Single-Span Plastic Greenhouse. Protected Horticulture and Plant Factory 28 (3): 225-233.
27. Shirzadi, M., P. A. Mirzaei, and M. Naghashzadegan. 2017. Improvement of k-epsilon turbulence model for CFD simulation of atmospheric boundary layer around a high-rise building using stochasticoptimization and Monte Carlo Sampling technique. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 171: 366-379.
28. Schulein, E. 2010. Shock-wave control by permeable wake generators. in the 5^{th} Flow Control Conference. Chicago, Illinois. USA.
29. Saberian, A., and S. M. Sajadiye. 2019. The effect of dynamic solar heat load on the greenhouse microclimate using CFD simulation. Renewable Energy 138: 722-737.
30. Santolini, E., B. Pulvirenti, S. Benni, L. Barbaresi, D. Torreggiani, and P. Tassinari. 2018. Numerical study of wind-driven natural ventilation in a greenhouse with Screens. Computers and Electronics in Agriculture 149: 41-53.
31. Sase, S. 2006. Air movement and climate uniformity in ventilated greenhouses. Acta Horticulture 719: 313-323.
32. Tong, G., D. M. Christopher, and G. Zhang. 2018. New insights on span selection for Chinese solar greenhouses using CFD Analyses. Computers and Electronics in Agriculture 149: 3-15.
33. Teitel, M., J. I. W. Montero, and E. J. Baeza. 2012. Greenhouse design: concepts and trends. Acta Horticulturae 952: 605-620.
34. Teitel, M., R. Atias, and M. Barak. 2019. Gradients of temperature, humidity and CO_2 along a fan-ventilated greenhouse. Biosystems Engineering 106 (2): 166-174.
35. Velázquez, J. F., A. Rojano, A. Rishor, and W. O. Bustamante. 2015. Computational fluid dynamics achievements applied to optimal ccrop production in a greenhouse. New Perspectives in Fluid Dynamics. In Book: 76-100.
36. Walker, J. N. 1965. Predicting temperatures in ventilated greenhouses. Transactions of the ASAE 8 (3): 445-448.
37. Wilcox, D. C. 2006. Tubulence Modeling for CFD. DCW Industries.
38. William, B., and Jr. Brower. 1999. A Primer in Fluid MechanicsDynamics of Flows in One Space Dimension. CRC Press. P:24.
39. Zabeltitz, V. 1986. Greenhouse heating with solar energy. Energy in Agriculture 5: 111-120.
40. Zabeltitz, V. 1999. Greenhouse structure. In: Stanhill G, ZVI Enoch H Greenhouse ecosystems. Ecosystems of the world. Elsevier, Amsterdam, pp 20:17-69.
41. Zarei, G. 2017. Structural challenges of greenhouses in Iran. Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 2 (2): 149-162. (In Farsi).
42. Zhang, G., Z. Fu, M. Yang, X. Kim, Y. Dong, and X. Li. 2019. Nonlinear simulation for coupling modeling of air humidity and vent opening in Chinese solar greenhouse based on CFD. Computers and Electronics in Agriculture 162: 337-347.

43. Zhong, H. Y., D. D. Liu, D. Zhang, F. Y. Zhao, Y. Li, and H. Q. Wang. 2018. Two-dimensional numerical simulation of wind driven ventilation across a building enclosure with two free apertures on the rear side: Vortex shedding and "pumping flow mechanism". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 179: 449-462.
44. Ziaaddini, A., H. Mortezapour, M. Shams, and A. Sarafi. 2019. Energy and exergy analysis of a greenhouse heating system equipped with a parabolic trough concentrator and a flat -plate solar collector. Journal of Agricultural Machinery 9 (2): 439-453. (In Farsi).

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 11, No. 2, Fall - Winter 2021, p. 247-262

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۲۶۲-۲۴۷

Ventilation and Cooling Modeling and Lyout of Fans, Pads and Vents of an Octagonal Greenhouse

J. Javadi Moghaddam[1*], S. Ozlati[2], Gh. Zarei[1], D. Momeni[1], F. Azadshahraki[1]

Received: 24-07-2019
Accepted: 08-10-2019

Introduction

Greenhouse technology is a flexible solution for sustainable year-round cultivation of many horticulture products, particularly in regions with adverse climate conditions or limited water and resources. Greenhouses are the structures that provide the desired conditions for plant growth throughout the all seasons. Plant growing and crop production in the greenhouses require proper ventilation conditions to provide optimal temperature, relative humidity and CO_2 and to minimize the toxic gases. Ventilation method of greenhouse is depending on the design of greenhouse ventilation and cooling is usually done by evaporative pad and fan systems or fan and vent systems. Recently different designs, different structures and different layouts of fans, pads and vents are used in greenhouses. Layout of fans, pads and vents affects the performance of ventilation systems. The aim of this study was to layout the fans, pads and vents to provide best air flow in an octagonal greenhouse.

Materials and Methods

In this study, three layouts of evaporative pad and fan systems and vents were modeled by computational fluid dynamics (CFD) method. For computational fluid dynamic of inside greenhouse airflow, the air flow was considered to be compressible. In order to estimate density, velocity and temperature, the Navier- Stokes equation included momentum, state, energy, continuity was used. For modeling the fluid flow, all necessary and dependent parameters of climate were considered based on the concentration and air pressure at the level of the open sea. Fluid flow equations were solved by finite volume technique. Three mentioned layouts of this study were 1- fans on the roof of the pyramids and vents on the wall of the pyramids, 2- pads and fans on the greenhouse side walls and 3- pads on the greenhouse side walls and fans on the roof of the pyramids (parallel pads). The performances of each arrangement can be improved by the speed of the fans, the size of the vents. The main equation in fluid flow simulation using CFD can be done by the following set of equations in which the continuity equation in the form of indicial notation can be presented as:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

Moreover, the momentum equation can be written by the following form:

$$\rho\left(\frac{\partial u_j}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{1}{YM^2}p - \frac{1}{3}\frac{\mu}{Re}\frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right) + \frac{\mu}{Re}\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

$$\rho\left(\frac{\partial e}{\partial t} + u_j \frac{\partial e}{\partial x_j}\right) = \frac{Y}{RePr}\frac{\partial}{\partial x_j}\mu\frac{\partial e}{\partial x_j} - \left(\frac{1}{YM^2}p + \frac{2}{3}\frac{\mu}{Re}\frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right) + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\mu}{Re}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$P = \rho e \quad (4)$$

The equation 4 shows the state equation in a fluid flow interaction. All technical calculations and CFD simulations were done by Solidworks 2018 software.

Results and Discussion

The results showed that octagonal greenhouse by a specific form of the vents on the walls and fans on the roof could provide a circular air flow around the plants in the greenhouse. However, due to different powers of the fans, different velocity and different shape of air circulation could be achieved. When pads and fans are located on the greenhouse side walls, uniform air flow from the pads move uniformly throughout the greenhouse and then exit from opposite fans which causes desired air flow in the greenhouse. When the fans are located on the roof of the pyramids and pads are located on the side walls parallel, pad surface increases in the greenhouse and thus relative humidity increases and temperature decreases.

Conclusions

Because of the specific shape of the vents in octagonal greenhouse, different air velocity and different shape of air circulation will be achieved when different power of the fan is used. This causes that the octagonal greenhouse can be used in different climate conditions. When the fans are located on the roof of the pyramids

1- Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
2- Private Partner
(*- Corresponding Author Email: Jalaljavadimoghaddam@gmail.com)

and pads are located on the side walls, temperature decreases and relative humidity increases and this layout is desirable for hot and dry climate. An octagonal greenhouse can be used in different climate by using a suitable layout of fan, pad and vents.

Keywords: CFD, Cooling, Octagonal greenhouse, Ventilation